

二维弯曲型线缺陷磁振子晶体的缺陷态性质

宋娜, 萨其尔, 杨慧, 曹永军

(内蒙古师范大学 物理与电子信息学院, 呼和浩特 010022)

摘 要:在磁振子晶体中首次引入弯曲型的线缺陷结构, 利用超原胞近似下的平面波展开法, 数值计算了由铁(Fe)圆柱正方排列于氧化铈(EuO)基底材料中构成的二维弯曲型线缺陷磁振子晶体的带结构和缺陷模的磁化强度场分布, 研究了磁振子晶体中弯曲线缺陷结构的缺陷态性质.

关键词:磁振子晶体; 平面波展开法; 弯曲型线缺陷

中图分类号: O482

文献标志码: A

近 30 年来, 在凝聚态物理、材料物理等研究领域, 对波在人工微结构周期复合材料中的传播性质研究一直是个热点问题. 它包括对半导体超晶格、光子晶体、等离子晶体、声子晶体等复合材料的研究. 其主要目的就是利用这些周期复合材料带隙结构的特性, 实现对其中传播波的可控操作^[1]. 因同频率的自旋波波长比声波或电磁波波长短很多, 所以对自旋波周期复合材料的制作更困难些, 晶体尺寸通常在微纳米尺度范围. 但是随着微纳米制造加工技术的发展和进步, 制作和研究自旋波周期复合材料已成为可能. 这种复合材料是铁磁材料的周期结构, 因自旋波的量子化被称为磁振子, 故这种周期复合材料类似地被称为磁振子晶体(Magnonic crystals), 其晶格常数一般在纳米到微米间^[2-3]. 磁振子晶体的研究可分为体材料和板材料 2 个领域. 在体材料领域内, 不考虑表面效应, 研究相对比较成熟一些; 但在板材料领域内, 需考虑表面效应, 理论研究要更加困难, 目前仍是研究的热点. 磁振子晶体无论是体材料还是板材料, 根据周期结构的维度, 磁振子晶体均可被分为一维、二维或三维系统. 本课题组在过去几年内, 曾对二维体状的磁振子晶体中缺陷态性质进行过系统的研究^[4-6], 包括点缺陷、点缺陷耦合以及直线型的线缺陷结构等. 研究表明利用磁振子晶体中的缺陷体结构, 可引起自旋波的 Anderson 局域化现象. 若根据实际应用的需求, 设计恰当的缺陷结构, 利用自旋波的这种局域化现象, 可实现对自旋波的滤波、导波、分流等可控操作. 可见, 含缺陷体结构的磁振子晶体复合材料在自旋波信号处理器件的制作材料领域有潜在的应用价值^[7-8]. 据此思想, 本文在前人对直线型线缺陷结构的研究基础上, 又进一步设计了弯曲型的线缺陷结构磁振子晶体系统. 利用课题组提出的超原胞近似下的平面波展开法数值计算了复合系统的带结构和缺陷模的磁化强度场分布, 研究了缺陷态的局域性质以及对自旋波的导波作用, 发现可实现自旋波的弯曲导波作用.

1 模型与计算方法

图 1(a)为一种二维弯曲型线缺陷结构磁振子晶体 11×11 超原胞结构示意图, 其中单元胞的晶格常数 $a=10$ nm, 两种不同的铁磁材料分别用黑白两种颜色表示. 通过改变 11×11 超原胞中部分圆柱体的大小即可引入缺陷结构, 如图 1(a)所示引入了弯曲型的线缺陷结构. 图 1(b)则为正方晶格的第一布里渊区及各方向的高对称线. 自旋波在铁磁材料中传播的动力学方程为 Landau-Lifshitz 方程^[9-10]

收稿日期:2015-03-12; 修回日期:2015-04-15.

基金项目:国家自然科学基金(11264028); 内蒙古自治区自然科学基金(2012MS0114).

作者简介:宋娜(1989-), 女, 内蒙古锡林浩特人, 内蒙古师范大学硕士研究生, 主要从事人工微结构复合材料物理研究.

通信作者:曹永军(1975-), 男, 内蒙古呼和浩特人, 内蒙古师范大学教授, 主要从事人工微结构复合材料物理研究,

E-mail: phyjcao@imnu.edu.cn.

$$\frac{\partial}{\partial t} M(r, t) = -gM(r, t) \times H_{\text{eff}}(r, t). \quad (1)$$

这里忽略了阻尼效应, g 是旋磁比($g > 0$), H_{eff} 为作用于磁化强度矢量 M 上的有效场. 方程(1)是关于磁化强度 $M(r, t)$ 的一个局域点方程, 或者说是一个场方程, 故不需要考虑散射体材料(圆柱体)与基底材料之间的边界条件. 当晶格常数在纳米数量级下, 铁磁系统中的磁相互作用主要为交换作用项, 相比较磁偶极相互作用可被忽略^[11], 故有效场表示为外磁场和交换场的叠加

$$H_{\text{eff}}(r, t) = H_0 z + \frac{\partial}{\partial r} \left(\alpha_0 \frac{\partial}{\partial r} M(r, t) \right), \quad (2)$$

其中, $\alpha_0 = \frac{2A}{\mu_0 M_s}$, M_s 和 A 分别为铁磁材料的自发磁化强度和交换作用系数, μ_0 为真空磁导率. 设二维周期结构在 $x-y$ 平面内, 整个铁磁材料系统被外磁场 H_0 沿柱体方向饱和磁化, 磁化强度

$$M(r, t) = M_s z + m(r, t), \quad (3)$$

其中, $m(r, t)$ 为磁化强度矢量 M 在 $x-y$ 平面内的动态分量, 且动态分量的大小远小于系统的饱和磁化强度大小, 即 $|m(r, t)| \ll M_s$, 在这里自发磁化强度大小约等于饱和磁化强度大小.

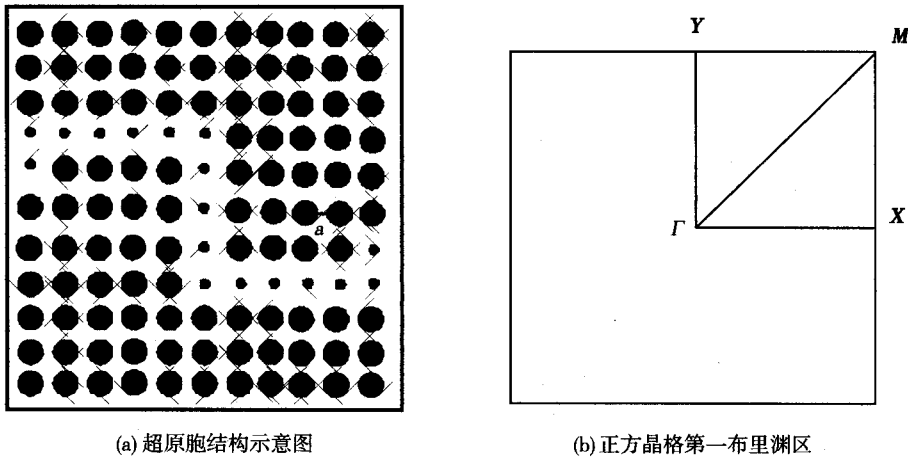


图1 二维弯曲型线缺陷结构磁振子晶体示意图

设变量 $m_{\pm} = m_x \pm im_y$, 并将方程(2)和(3)代入方程(1)中, 得到关于 m_+ 和 m_- 变量的2个相互独立的动力学方程

$$\mp \frac{i}{g} \frac{\partial m_{\pm}}{\partial t} = \left[H_0 - \frac{\partial}{\partial r} \left(\alpha_1 \frac{\partial}{\partial r} \right) \right] m_{\pm}, \quad (4)$$

其中, $\alpha_1 = \frac{2A}{\mu_0 M_s}$. 对传播的自旋波模式, 可设其为时谐的平面简谐波 $m_{\pm}(r, t) = m_{\pm\omega}(r) e^{\pm i\omega t}$, 将其代入方程(4)得

$$\Omega m_{\pm\omega} = \left[\mu_0 H_0 - \frac{\partial}{\partial r} \left(\alpha \frac{\partial}{\partial r} \right) \right] m_{\pm\omega}, \quad (5)$$

其中, $\alpha = \frac{2A}{M_s}$, $\Omega = \frac{\mu_0 \omega}{g}$. 又因在周期结构的系统中, $m_{\pm\omega}(r)$ 和 $\alpha(r)$ 均为空间位置矢量 $r = (x, y)$ 的周期函数, 故可在倒格矢 G 矢量空间内将其作傅立叶级数展开, 应用布洛赫定理得

$$m_{\pm\omega}(r) = \sum_G m_{\pm\omega}(G) e^{i(k+G)r}, \quad (6)$$

$$\alpha(r) = \sum_G \alpha(G) e^{iGr}, \quad (7)$$

倒格矢 G 可写成如下形式 $G = \frac{2\pi}{11a} (n_x, n_y)$, 其中的 n_x, n_y 为整数. 傅立叶展开系数 $\alpha(G)$ 与超原胞的结构有关, 对如图1(a)所示的弯曲型线缺陷的超原胞, 经过解析计算 $\alpha(G)$ 得

$$\alpha(G) = \begin{cases} \frac{1}{121} \{ [\alpha_A f + \alpha_B (1-f)] + 17\alpha_A f_d + 17\alpha_B (1-f_d) \}, & \text{当 } G = 0 \text{ 时,} \\ \frac{1}{121} (\alpha_A - \alpha_B) \left\{ \left[\sum_{-5}^5 \sum_{-5}^5 \cos\left(\frac{2\pi}{11}(m_1 n_x + m_2 n_y)\right) - \sum_{-5}^0 \cos\left(\frac{2\pi}{11}(m_1 n_x + 2n_y)\right) - \sum_{-1}^1 \cos\left(\frac{2\pi}{11} m_1 n_y\right) - \right. \right. \\ \left. \sum_0^5 \cos\left(\frac{2\pi}{11}(m_1 n_x - 2n_y)\right) - 2\cos\left(\frac{2\pi}{11}(5n_x - n_y)\right) \right] P(G) + \left[\sum_{-5}^0 \cos\left(\frac{2\pi}{11}(m_1 n_x + 2n_y)\right) + \right. \\ \left. \sum_{-1}^1 \cos\left(\frac{2\pi}{11} m_1 n_y\right) + \sum_0^5 \cos\left(\frac{2\pi}{11}(m_1 n_x - 2n_y)\right) + 2\cos 2\cos\left(\frac{2\pi}{11}(5n_x - n_y)\right) \right] P_d(G) \right\}, & \text{当 } G \neq 0 \text{ 时,} \end{cases} \quad (8)$$

其中, $f_d = \frac{\pi r_d^2}{a^2}$, $f = \frac{\pi r^2}{a^2}$ 分别是缺陷柱体和完整柱体材料在单原胞中的体积填充率. 若缺陷柱被完全移除, 则 $r_d = 0$. $P_d(G)$ 和 $P(G)$ 分别为缺陷柱体和完整柱体的结构函数, 其值取决于散射体的具体形状. 对横截面为圆的散射体而言, 有 $P(G) = 2f \frac{J_1(Gr)}{Gr}$. 将方程(6)~(8)式代入方程(5)式, 即可得倒格子空间的本征方程

$$\Omega m_{\pm\omega}(G) = \sum_{G'} [\mu_0 H_0 \delta(G-G') + (k+G)(k+G') \alpha(G-G')] m_{\pm\omega}(G'). \quad (9)$$

其中, $\delta(G-G') = \begin{cases} 1, & \text{当 } G = G' \text{ 时,} \\ 0, & \text{当 } G \neq G' \text{ 时.} \end{cases}$ 在如图1(b)所示的第一布里渊区各高对称线上, 给定波矢 $k = (k_x, k_y)$ 值, 通过数值求解本征方程(9)式, 即可得到磁振子晶体的带结构 $\Omega_n(k)$. 很明显方程(9)所表示的是二组相互独立的无穷个线性方程组, 在实际的数值计算中, 它们具有共同的本征值, 研究带结构只需求解其中的一组本征方程即可. 上述数值计算磁振子晶体带结构的算法, 即为本课题组提出的改进平面波展开法^[12].

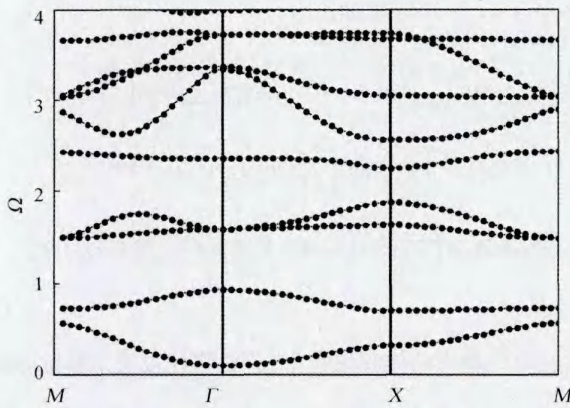
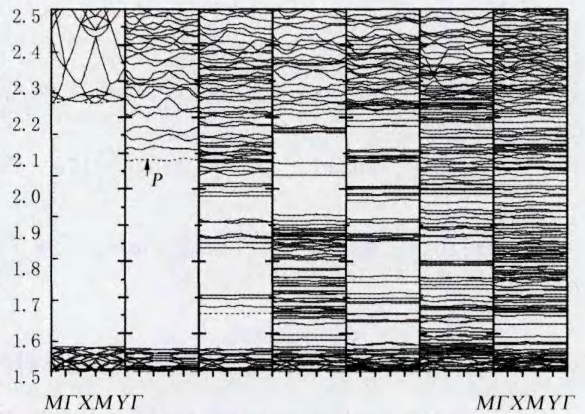
2 数值结果与讨论

前人研究已表明, 磁振子晶体系统的2种材料的磁参数(主要是交换作用系数和自发磁化强度)相差悬殊较大时, 更易于出现自旋波带隙^[13], 故这里选用的系统仍然同文献[13], 即散射体为铁(Fe)圆柱体, 基底为氧化铕(EuO)材料, 散射体按正方晶格排列于基底材料中构成的二维磁振子晶体模型. 其次, 计算中晶格常数和外磁场分别取为 $a = 10 \text{ nm}$ 和 $\mu_0 H_0 = 0.1 \text{ T}$. 对纳米级的晶格常数范围内, 磁相互作用可主要考虑交换作用, 而忽略静磁耦合作用, 从而采用上述提出的平面波展开法是有效可行的. Fe材料和EuO材料的交换常数以及自发磁化强度分别选取为 $A = 2.1 \times 10^{-11} \text{ J} \cdot \text{m}^{-1}$, $M_s = 1.752 \times 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ 以及 $A = 0.1 \times 10^{-11} \text{ J} \cdot \text{m}^{-1}$, $M_s = 1.910 \times 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$. 平面波展开法成功应用的关键是要保证数值计算结果的收敛性问题^[13], 本文经收敛性检验计算表明, 取 $3249(-28 \leq n_x, n_y \leq 28)$ 个倒格矢能够获得足够的收敛精度要求.

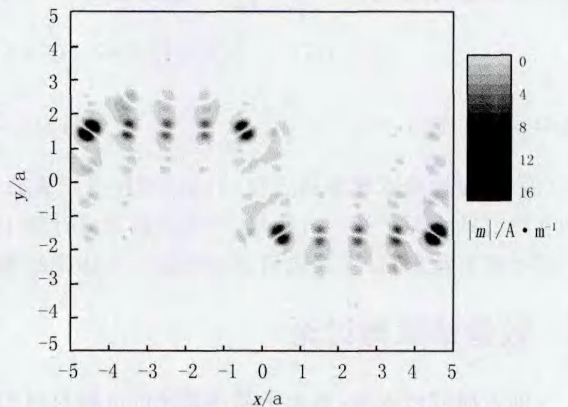
首先考虑理想磁振子晶体情形, 即无任何缺陷体的情形. 图2为散射体的体积填充率为 $f = 0.60$ 时的自旋波带结构图, 发现多个自旋波带隙出现在带结构中. 带隙的存在意味着, 可沿磁振子晶体周期结构方向传播的且频率位于带隙范围内的自旋波模式会被周期结构所抑制. 据此思想, 利用理想的磁振子晶体就可设计出良好的自旋波带通滤波器, 自旋波周期结构复合材料即磁振子晶体, 在自旋波器件制作材料领域内有潜在的应用价值.

当在理想磁振子晶体中引入如图1(a)所示的弯曲型线缺陷, 线缺陷结构是通过改变部分Fe圆柱大小引入的, 及缺陷体的体积填充率 $f_d \neq 0.6$. 不同缺陷结构的磁振子晶体带隙结构如图3所示. 分析带隙结构可发现, 自旋波带隙宽度随着缺陷体的减小而变窄. 这是由于缺陷结构的引入在带隙范围内出现了若干缺陷模, 构成了一个小范围内的通带, 部分缺陷模的斜率不为零, 意味着其群速度 $v_g = \frac{\partial \omega}{\partial k}$ 不为零, 而且缺陷模随着缺陷体的减小不断在下移, 如图3虚线所示的带隙范围内最低缺陷模, 当 $f_d = 0.3$ 时, 最低缺陷模下移进入了导带. 另一方面子带隙随着 f_d 的减小在先变宽后变窄的特点. 可见, 带隙内缺陷态和子带隙的频率位置以及大小, 均可通过缺陷体的大小来调节. 这些特点的发现, 为磁振子带隙结构的调控提供了一个因素.

在人工微结构复合材料领域内, 线缺陷结构的引入, 主要目的是实现波的导波作用, 而且不仅能直线导

图2 理想磁振子晶体带结构, $f=0.60$ 图3 不同缺陷大小下的磁振子带隙结构, $f=0.60$

波,还要实现曲线导波,这一点才更具有实际应用的意义.因为假若利用磁振子晶体材料实现自旋波信号处理器,曲线线路的设计是无法避免的,这也是本文研究弯曲型线缺陷结构磁振子晶体缺陷态性质的应用意义所在,为此需要研究带隙范围内缺陷模的能量空间分布情况.当 $f_d=0.4$ 时,在如图3所示的 P 点处,即沿 ΓX 方向布洛赫波矢 $(k_x, k_y) = \frac{2\pi}{11a}(0.2, 0.0)$ 时,自旋波磁化强度动态分量模场 $|m|$ 分布如图4所示.自旋波的能量正比于磁化强度幅值的平方,意味着缺陷态的能量可以沿着弯曲型的线缺陷方向传播和输运,从而实现自旋波的弯曲导波作用.

图4 磁化强度动态分量模场 $|m|$ 在 11×11 超原胞内的分布

3 结论

首次在磁振子晶体中提出和引入弯曲型的线缺陷结构,并应用课题组提出的改进平面波展开法数值计算和研究了磁振子带隙结构和缺陷态的性质.研究表明,包含弯曲型线缺陷结构的磁振子晶体复合材料的带隙中会产生一些波导模式,自旋波的能量被局域在弯曲型线缺陷结构的附近.从而使对应的自旋波模式可沿弯曲结构的方向进行能量传播和输运,实现了自旋波在磁振子晶体中曲线导波作用,这在实现自旋波信号处理器制作材料的研究领域内有重要意义.另外也发现,缺陷体的大小即体积填充率对缺陷模的性质有重要的影响,通过调节缺陷体的大小即可调节缺陷态在带隙范围内的频率位置.此方法为实现波导模式的可调性提供了一种有效的途径.对缺陷态这些性质的研究,可为将含弯曲型线缺陷结构的磁振子晶体复合材料应用于自旋波波导器件的制作材料领域,提供坚实的理论基础.

参 考 文 献

- [1] Krawczyk M, Grundler D. Review and prospects of magnonic crystals and devices with reprogrammable band structure [J]. J Phys: Condens Matter, 2014, 26(12): 123202.
- [2] Lenk B, Ulrichs H, Garbs F, et al. The building blocks of magnonics [J]. Physics Reports, 2011, 507(4): 107-136.
- [3] Wang Q, Zhang H W, Ma G K, et al. Magnonic band gaps in two-dimension magnonic crystals with diffuse interfaces [J]. J Appl Phys, 2014, 115(11): 113904.

- [9] 王 辉, 顾利忠. 电导式液位变送器的设计[J]. 传感器技术, 2004, 23(6): 38-40.
 [10] 中华人民共和国水利部. SL237-1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.

The Influence of Gravel Mixed to Fracture Toughness of Clay

HU Junfeng^{1,2}, WANG Junjie^{1,2}

- (1. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
 2. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074)

Abstract: In order to explore the fracture toughness characteristic of soil, based on the improved standard three-point bending tests, affect of geostatic stress to the test results had been removed. Mixing soil with gravel of different content and different particle size to produce specimens which has the same moisture content, dry density and the initial crack, to study the variety of fracture toughness and propagation rules of crack. The result shows that while gravel content is between 0% and 20%, the fracture toughness decreases as the gravel content increases. When particle size is between 2mm and 40mm, with the same gravel content, fracture toughness decreases at a lower rate as the gravel particle size increases. When particle size is between 0.75 mm and 2 mm, the partial size of gravel had no significant effect on the fracture toughness. The result also proved that the particle size had impact on the directions and number of crack. Compared with coarse particle, specimens with fine particle will had more tiny reticulate crack at crack region. Specimens with coarse particle had bending phenomenon more easier in the developing process of crack.

Keywords: clay mixed gravel; fracture toughness; three-point bending beam test; horizontal loading; partical size

(上接第 44 页)

- [4] Yang H, Cao Y J, Yun G H. Point defect states of exchange spin waves in all-ferromagnetic two-dimensional magnonic crystals [J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2012, 111(1): 013908-013913.
 [5] Yang H Yun G H, Cao Y J. Coupling characteristics of point defects modes in two-dimensional magnonic crystals [J]. *J Appl Phys*, 2012, 112(10): 103911. [6] Xing D S, Yang H, Cao Y J. Waveguide properties in two-dimensional magnonic crystals with line defects [J]. *J Magn Mater*, 2015, 377(5): 286-290.
 [7] Kim S K, Lee K S, Han D S. A gigahertz-range spin-wave filter composed of width-modulated nanostrip magnonic-crystal waveguides [J]. *Appl Phys Lett*, 2009, 95(8): 082507.
 [8] Ma F S, Lim H S, Wang Z K. Micromagnetic study of spin wave propagation in bicomponent magnonic crystal waveguides [J]. *Appl Phys Lett*, 2011, 98(15): 153107.
 [9] Puzkarski H, Krawczyk M. Magnonic crystals-the magnetic counterpart of photonic crystals [J]. *Solid State Phenom*, 2003, 94: 125-134.
 [10] Vasseur J O, Dobrzynski L, Djafari-Rouhani B, et al. Magnon band structure of periodic composites [J]. *Phys Rev B*, 1996, 54(2): 1043-1049.
 [11] Kruglyak V V, Kuchko A N. Effect of the modulation of magnetic viscosity on the damping of spin waves in multilayer magnetic systems [J]. *Phys Met Metall*, 2001, 92(3): 211-214.
 [12] 曹永军, 云国宏, 那日苏. 平面波展开法计算二维磁振子晶体带结构[J]. *物理学报*, 2011, 60(7): 077502.
 [13] Cao Y J, Yun G H, Liang X X, et al. Band structures of two-dimensional magnonic crystals with different shapes and arrangements of scatterers [J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2010, 43(30): 305005-305009.

Properties of Defect States in Two-dimensional Magnonic Crystals with Bend Line Defects

SONG Na, SA Qier, YANG Hui, CAO Yongjun

(College of Physics and Electronic Information, Inner Mongolia Normal University, Huhhot 010022, China)

Abstract: In this paper, bend line defects are introduced in two-dimensional magnonic crystals. Band structures and field distributions of magnetization are calculated by using the plane-wave expansion method with the supper-cell approximation, and then the properties of defect states of bend line defects in two-dimensional magnonic crystals are investigated.

Keywords: magnonic crystal; plane-wave expansion method; bend line defects